

TEMA 12.

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL. APLICACIONES.

12. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, el término amplificador operacional se refiere a un componente integrado empleado en multitud de aplicaciones en diferentes circuitos electrónicos para el procesado analógico de señales, en operaciones lineales como amplificación, suma, resta, derivación, integración, etc., y no lineales, como comparación, rectificación, multiplicación, etc., para generación de señales sinusoidales, cuadradas, triangulares, etc., en fuentes de tensión y de corriente, filtros activos, convertidores analógico-digitales, etc.

El amplificador operacional es, en su versión más conocida, un amplificador de tensión con entrada diferencial y salida simple con las siguientes características:

- Ganancia muy elevada.
- Resistencia de entrada muy alta.
- Resistencia de salida muy baja.

Su denominación se debe a que en un principio se utilizó en las calculadoras analógicas para resolver operaciones matemáticas, tales como sumas y restas, integrales y en general ecuaciones diferenciales mediante señales eléctricas.

El amplificador operacional se compone de varias etapas integradas en un único chip:

- Etapa de entrada diferencial:* esta etapa toma la tensión diferencial de entrada y la amplifica. Debe proporcionar elevada resistencia de entrada.
- Etapas intermedias de amplificación:* su objetivo es aumentar la ganancia.
- Etapa final de potencia:* suministra una señal de alto nivel a la carga exterior. Debe proporcionar baja resistencia de salida.

Todas estas etapas deben ser polarizadas adecuadamente mediante fuentes de alimentación generalmente simétricas $\pm V_{cc}$, por ejemplo ± 12 V.

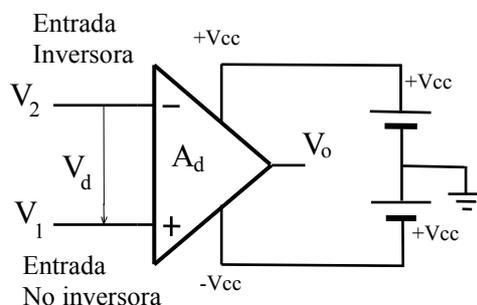


Fig. 12.1. Símbolo y tensiones de alimentación del amplificador operacional

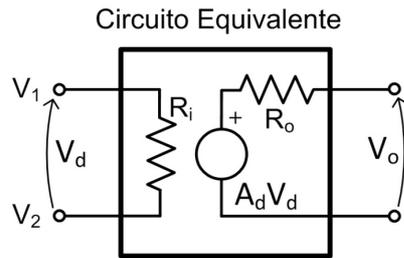


Fig. 12.2. Circuito lineal equivalente.

En la figura 12.1 se representa el símbolo para el amplificador operacional mostrando las conexiones de alimentación, y en la figura 12.2 su circuito lineal equivalente. A_d es la **ganancia de tensión diferencial** o **ganancia de bucle abierto**, típicamente entre 100 dB (10^5) y 200 dB (10^{10}).

En la figura 12.3 se muestra la característica de transferencia $V_o = f(V_d)$ de un amplificador operacional real.

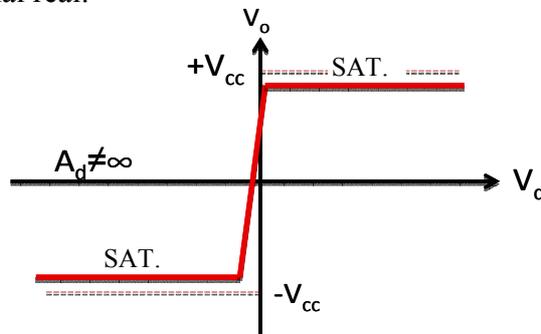


Fig. 12.3. Característica de transferencia de un amplificador operacional real.

12.1 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL.

En la figura 12.4 se observa el símbolo y tensiones aplicadas, y la característica de transferencia $V_o = f(V_d)$ correspondiente al amplificador operacional ideal se representa en la figura 12.5 (comparar con la del amplificador operacional real de la figura 12.3).

Definiremos como **amplificador operacional ideal** a un amplificador que posee las siguientes características:

- **Ganancia de tensión: infinita.**

Al ser la ganancia de tensión A_d infinita y dado que V_o es finita, se tiene que:

$$V_d = V_1 - V_2 = \frac{V_o}{A_d} = 0.$$

Por tanto, la condición $A_d = \infty$ se traduce en $V_1 = V_2$, y se dice que existe un cortocircuito virtual entre los dos terminales de entrada.

Si la tensión diferencial V_d es distinta de cero, el operacional sale de la zona de funcionamiento lineal y se dice que **satura (SAT.)**, proporcionando en su salida $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$ según V_d sea positiva o negativa, respectivamente.



De aquí se desprende que para que el operacional funcione en **zona lineal**, es decir con ganancia A_d infinita, ha de disponer de una red de **realimentación negativa**, que devuelve una fracción de la señal de salida al terminal de entrada inversor, forzando a que la tensión diferencial de entrada sea exactamente cero, al mismo tiempo que proporciona una ganancia en bucle cerrado dependiente exclusivamente de la red de realimentación.

- **Resistencia de entrada: infinita.**

La resistencia de entrada R_i infinita significa que por los terminales de entrada no se introduce corriente al operacional, pues también han de ser infinitas las impedancias desde cada terminal de entrada a masa.

- **Resistencia de salida: nula.**

La resistencia de salida R_o nula significa que el terminal de salida proporciona una tensión V_o independiente de la carga que se le conecte, o sea, que se comporta como un generador ideal de tensión. Es decir, un amplificador operacional ideal proporciona en su salida la corriente I_o que sea necesaria para mantener su V_o .

Otras características que también cumple son:

- **Ganancia de modo común: nula.**

La ganancia de modo común A_c nula implica que el AO ideal se comporta como un amplificador diferencial ideal, es decir, la tensión de salida V_o no depende de la tensión de modo común V_c a la entrada, sino que sólo depende de la tensión diferencial V_d .

- **Ancho de banda: infinito.**

El ancho de banda B infinito significa que el AO ideal proporciona ganancia infinita desde la frecuencia 0 (DC) hasta la frecuencia infinita.

- **Margen dinámico: $\pm V_{cc}$.**

Por último, el margen dinámico $\pm V_{cc}$ indica que la tensión V_o de salida puede tomar cualquier valor entre $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$.

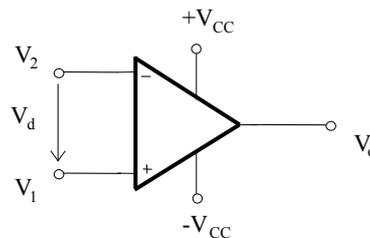


Fig. 12.4. Símbolo y tensiones aplicadas en un amplificador operacional ideal.

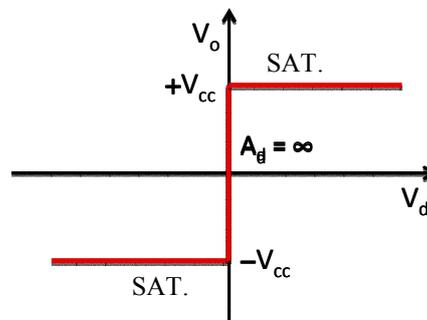


Fig. 12.5. Característica de transferencia del amplificador operacional ideal.

12.2 AMPLIFICADOR INVERSOR Y NO INVERSOR.

12.2.1 Amplificador inversor.

En la figura 12.6 se representa un amplificador inversor de tensión realizado en base a un operacional ideal.

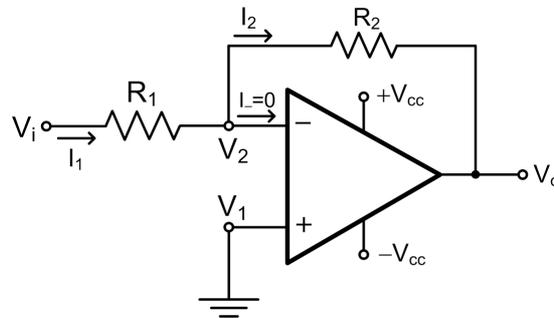


Fig. 12.6. Amplificador inversor con amplificador operacional.

La realimentación negativa, a través de la resistencia R_2 , permite al operacional trabajar en régimen lineal igualando las tensiones de los terminales V_1 y V_2 . Por tanto, la tensión V_2 del terminal inversor será siempre nula, sin estar conectado directamente a masa. Este efecto se denomina **tierra virtual**.

Se comprueba que la realimentación es negativa porque si suponemos que V_2 es positiva, la tensión de salida es negativa y parte de esta tensión negativa se devuelve a la entrada inversora a través de la resistencia de realimentación R_2 para forzar $V_2 = 0$.

La corriente I_1 que se absorbe de la fuente de señal de excitación V_i se drenará toda por la resistencia de realimentación R_2 , puesto que no puede entrar por el terminal inversor debido a su resistencia de entrada infinita. O sea, se cumplirá $I_1 = I_2$.

Analizando el circuito, y teniendo en cuenta que $V_2 = 0$, se tiene:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1} = I_2,$$

$$V_o = -I_2 R_2 = -\frac{R_2}{R_1} V_i.$$

De este resultado podemos obtener las siguientes consecuencias:

- La ganancia de tensión A_v del amplificador realimentado vale $-R_2/R_1$, es decir, sólo depende del cociente de las dos resistencias R_1 y R_2 . Por tanto, se tratará de una ganancia muy estable y podrá ser controlada fácilmente.
- La tensión de salida está, además de amplificada, invertida con respecto a la de entrada, de ahí el nombre de amplificador inversor.
- La resistencia de entrada es $R_i = V_i/I_1 = R_1$.
- La resistencia de salida es cero por ser la propia del AO ideal.

12.2.2 Amplificador no inversor.

El siguiente montaje de la Fig. 12.7, realizado con un AO ideal, amplifica la señal de entrada sin invertirla, de ahí el nombre de amplificador no inversor.

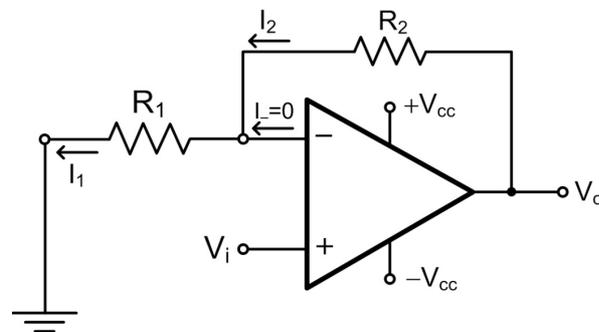


Fig. 12.7. Amplificador no inversor con amplificador operacional.

Analizando el circuito, y teniendo en cuenta que en este caso $V_2 = V_i$, se tiene:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1} = I_2,$$

$$V_o = I_2 R_2 + V_i = V_i \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right).$$

De este resultado, se desprenden las siguientes características:

- La ganancia de tensión A_v del amplificador realimentado viene dada por $1 + R_2/R_1$, o sea, depende de las resistencias exteriores al dispositivo activo. En este caso, es siempre mayor o igual que la unidad y positiva, es decir que la tensión de entrada está en fase con la de salida.
- La resistencia de entrada es infinita puesto que la señal se aplica directamente a la entrada del operacional que estamos suponiendo ideal.
- La resistencia de salida es cero por ser la propia del AO ideal.

12.2.3 Seguidor de tensión.

Si en el amplificador no inversor hacemos R_1 infinita y R_2 cero, obtenemos el seguidor de tensión o seguidor de emisor, según la figura 12.8.

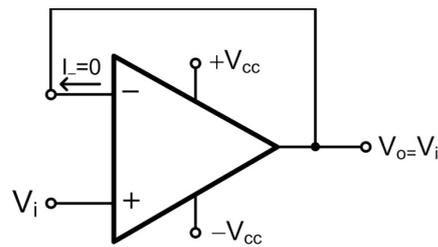


Fig. 12.8. Seguidor de tensión.

El análisis del circuito nos lleva a que $V_o = V_i$, es decir, la tensión de entrada se transmite íntegra a la salida, de ahí el nombre de seguidor de tensión. El generador de señal V_i se encuentra con una resistencia de entrada infinita y no se le extrae corriente, mientras que la carga recibe esa tensión V_i y puede absorber cualquier corriente. Se utiliza como separador (*buffer*) entre un generador y una carga.

12.3 SUMADOR INVERSOR Y NO INVERSOR.

12.3.1 Sumador inversor.

El sumador inversor permite la suma analógica de varias señales (con polaridad invertida) sin que exista ninguna interacción entre los diferentes generadores, ya que la entrada del operacional presenta un cortocircuito virtual.

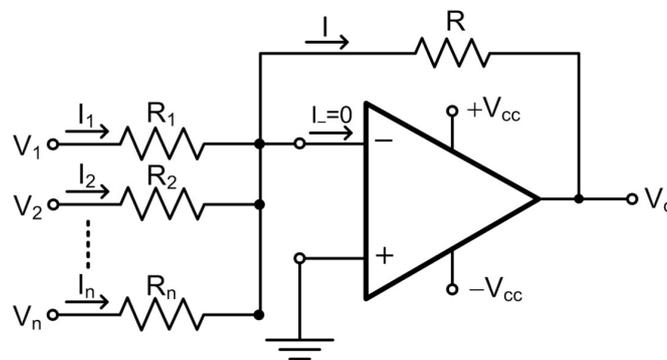


Fig. 12.9. Sumador inversor.

Aplicando el principio de superposición teniendo en cuenta la ganancia del amplificador inversor visto anteriormente, se obtiene:

$$V_o = -\left(\frac{R}{R_1}V_{i1} + \frac{R}{R_2}V_{i2} + \dots + \frac{R}{R_N}V_{iN}\right).$$

La tensión de salida es la suma ponderada de todas las entradas. Como caso particular, si todas las resistencias son iguales se obtiene:

$$V_o = -(V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}).$$

12.3.2 Sumador no inversor.

En el sumador no inversor, la tensión de salida es proporcional a la suma de las tensiones de entrada.

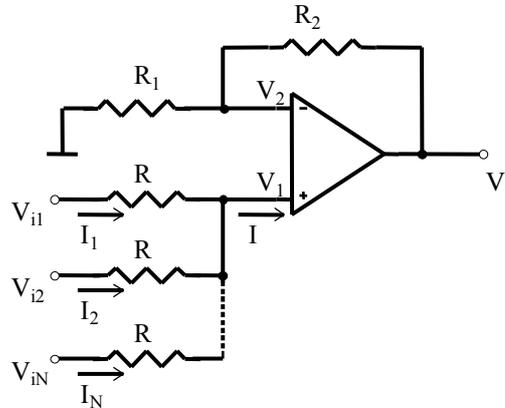


Fig. 12.10. Sumador no inversor.

Dado que la intensidad I en la entrada del operacional es nula, $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N = 0$, y aplicando la ley de Ohm tenemos que:

$$\frac{V_{i1} - V_1}{R} + \frac{V_{i2} - V_1}{R} + \dots + \frac{V_{iN} - V_1}{R} = 0,$$

de donde:

$$V_1 = \frac{V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}}{N},$$

y teniendo en cuenta la ganancia del amplificador no inversor visto anteriormente:

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{NR_1} (V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{iN}).$$

12.4 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL.

12.4.1 Amplificador diferencial (Restador).

El montaje clásico de amplificador diferencial con un solo operacional es el de la figura 12.11.

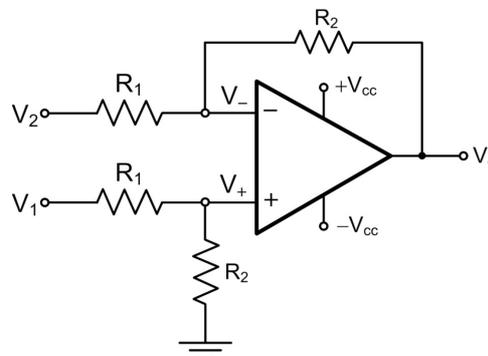


Fig. 12.11. Amplificador diferencial (restador).

Igualando las tensiones V_+ y V_- se tiene:

$$\left. \begin{aligned} V_+ &= V_{i1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ V_- &= V_{i2} + \frac{V_o - V_{i2}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{i1} R_2 = V_{i2} (R_1 + R_2) + (V_o - V_{i2}) R_1 = V_{i2} R_2 + V_o R_1.$$

Y la tensión de salida se obtiene como:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_{i1} - V_{i2}).$$

La ganancia $A_d = R_2/R_1$ sólo depende de las resistencias R_1 y R_2 y el factor de rechazo del modo común depende del grado de apareamiento de las dos resistencias R_1 y de las dos resistencias R_2 .

Un inconveniente de este circuito es que si se desea hacer la ganancia ajustable mediante resistencias potenciométricas¹, es preciso variar dos simultáneamente, con las dificultades que ello conlleva. Además, la resistencia de entrada $R_{id} = 2R_1$ es finita y las resistencias a tierra desde cada terminal $R_{ic1} = R_1 + R_2$ y $R_{ic2} = R_1$ son finitas y distintas.

La solución a estos problemas se encuentra en el circuito de la figura 12.12 conocido como **amplificador (diferencial) de instrumentación**, donde las entradas se conectan directamente a los terminales no inversores de los operacionales proporcionando resistencias de entrada infinitas.

12.4.2 Amplificador diferencial de instrumentación.

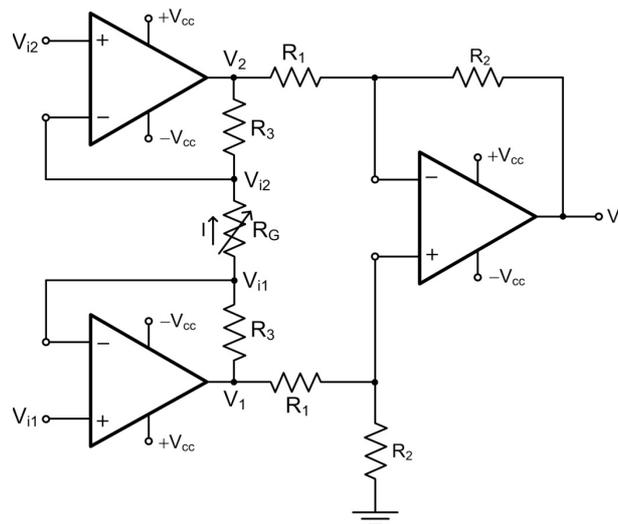


Fig. 12.12. Amplificador diferencial de instrumentación.

¹ Es una resistencia variable, es decir, es posible modificar su valor óhmico mediante un dispositivo móvil llamado cursor. La resistencia puede variar entre 0 y un valor máximo de su resistencia. La resistencia potenciométrica soporta pequeñas corrientes.

La intensidad de corriente I que circula por el serie R_3 - R_G - R_3 viene dada por:

$$I = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{R_G},$$

que proporciona una diferencia de potencial V_1 - V_2 igual a:

$$V_1 - V_2 = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{R_G} (2R_3 + R_G) = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) (V_{i1} - V_{i2}).$$

Teniendo en cuenta la ganancia de la etapa de salida, se tiene que:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) (V_{i1} - V_{i2}).$$

Observamos que variando la resistencia R_G , que es única, se varía la ganancia fácilmente. Además proporciona resistencia de entrada infinita y resistencia de salida nula.

12.5 INTEGRADOR Y DIFERENCIADOR INVERSOR.

12.5.1 Integrador inversor.

Una de las aplicaciones más clásicas del amplificador operacional es su uso como integrador. En este caso, la tensión de salida es proporcional a la integral en el tiempo de la señal de entrada.

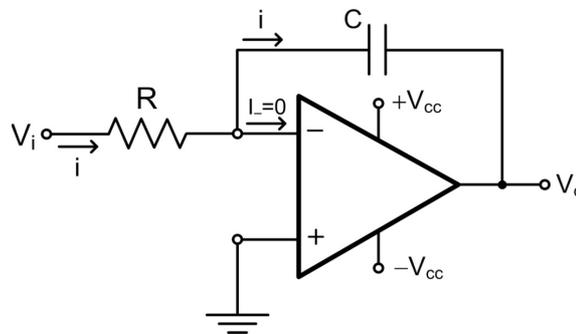


Fig. 12.13. Integrador inversor.

Dado que $i = V_i/R$, podemos escribir:

$$V_o = -\frac{1}{C} \int i \cdot dt = -\frac{1}{RC} \int V_i \cdot dt.$$

Como puede observarse, la tensión de salida lleva signo invertido, de ahí el nombre de integrador negativo o inversor. Podemos obtener el valor de V_o en un instante t mediante una integral definida si se conoce la tensión $V_o(t_0) = V_{oi}$ en un instante inicial t_0 , dado que:

$$dV_o = -\frac{1}{RC} V_i \cdot dt,$$

con lo que podemos escribir:

$$\int_{V_{oi}}^{V_o} dV_o = V_o - V_{oi} = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t V_i dt,$$

de donde:

$$V_o(t) = V_{oi} - \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t V_i(t) dt.$$

Para el caso particular de aplicar a la entrada un escalón de tensión de amplitud V , si en $t = t_0 = 0$ el condensador está totalmente descargado ($V_{oi} = 0$), la expresión anterior se simplifica y da lugar a una tensión de salida de la forma:

$$V_o = -\frac{V}{RC} t,$$

que representa una rampa negativa de tensión.

12.5.2 Diferenciador (derivador) inversor.

El circuito de la figura 12.14 es un circuito diferenciador inversor, que resulta de intercambiar de posición la resistencia y el condensador del circuito integrador inversor. Se obtiene una tensión de salida proporcional a la derivada en el tiempo de la tensión de entrada.

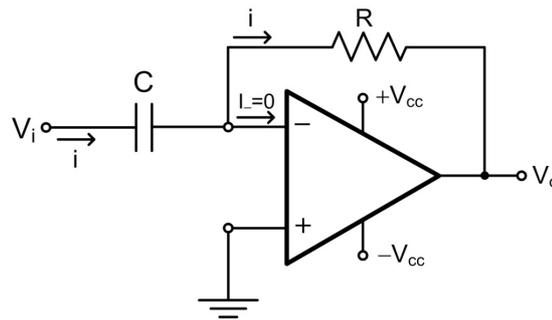


Fig. 12.14. Derivador inversor.

Por ser $V_c = V_i$, se tiene: $i = C \frac{dV_i}{dt}$, y por tanto, $V_o = -i \cdot R = -RC \frac{dV_i}{dt}$.

12.6 COMPARADORES.

Los comparadores analógicos de tensión utilizan la posibilidad de funcionamiento del amplificador operacional en régimen de saturación o en zona no lineal, al no disponer de ninguna red de realimentación negativa. Pueden funcionar en lazo abierto o bien con realimentación positiva. Este régimen queda caracterizado porque la tensión de salida toma idealmente únicamente dos valores: $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$.

12.6.1 Comparador en lazo abierto.

Un comparador o detector analógico es un circuito que permite conocer si una señal de valor V_i desconocido es mayor o menor que una tensión de referencia V_R conocida. La manera más simple de construir un comparador ideal de este tipo consiste en conectar un amplificador operacional como se muestra en la figura 12.15.

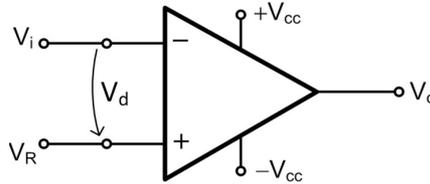


Fig. 12.15. Comparador en lazo abierto.

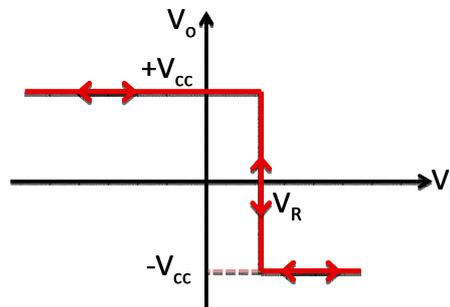


Fig. 12.16. Característica de transferencia del comparador en lazo abierto.

Para tensiones de entrada $V_i < V_R$, el terminal no inversor está a mayor tensión que el inversor y $V_o = +V_{cc}$. Para tensiones de entrada $V_i > V_R$, el terminal no inversor está a menor tensión que el inversor y $V_o = -V_{cc}$. En la figura 12.16 se muestra la característica de transferencia inversora de este comparador. Si se intercambian de posición V_i y V_R se obtendrá un comparador no inversor.

12.6.2 Comparador con histéresis (Disparador de Schmitt).

El comparador en lazo abierto visto anteriormente presenta un problema cuando $V_i = V_R$, pues en tal caso la tensión de salida no está determinada apareciendo una oscilación en la práctica cuando la tensión de entrada está próxima a la de referencia. Este problema se soluciona utilizando un bucle de realimentación positiva como en la figura 12.17.

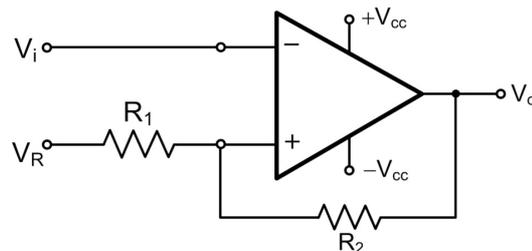


Fig. 12.17. Comparador con histéresis.

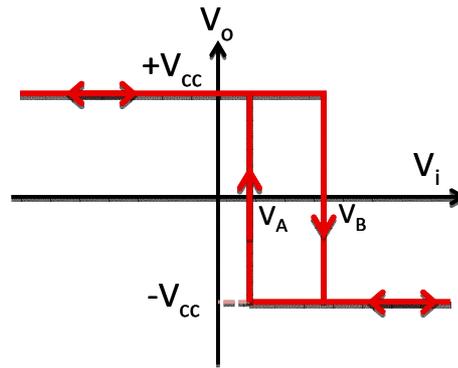


Fig. 12.18. Característica de transferencia del comparador con histéresis.

Para el análisis de este circuito vamos a considerar que la tensión de entrada V_i es infinitamente elevada y negativa. En este caso, sea cual sea V_R , la tensión de salida V_o será igual a $+V_{cc}$, y el terminal no inversor se encuentra a una tensión V_B que viene dada por:

$$V_B = V_R + \frac{V_{CC} - V_R}{R_1 + R_2} R_1 = V_R \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Mientras la tensión de entrada V_i se mantenga por debajo de V_B , la tensión de salida será $+V_{CC}$, pero si la supera la salida conmuta a $-V_{CC}$ y el terminal no inversor pasa a tener una nueva tensión V_A cuyo valor es:

$$V_A = V_R - \frac{V_R + V_{CC}}{R_1 + R_2} R_1 = V_R \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Esta situación se mantendrá mientras V_i esté por encima de V_A . Observamos que existe una diferencia (denominada **histéresis**) entre las tensiones umbrales de conmutación en función del estado de la salida, de valor:

$$V_H = V_A - V_B = \frac{2V_{CC}R_2}{R_1 + R_2}.$$

Si en el circuito comparador anterior cambiamos de posición V_i con V_R obtenemos un montaje de comparador no inversor.